

油 气 运 移

B. A. 索柯洛夫

科 学 出 版 社

油 气 运 移

B. A. 索柯洛夫 著

郑厚安 义和 译

科 学 出 版 社

1959

В. А. СОКОЛОВ
МИГРАЦИЯ ГАЗА И НЕФТИ
Изд-во АН СССР

內 容 簡 介

油气运移是一个极其复杂的问题。B. A. 索柯洛夫教授的这一著作，阐述了这方面的科学研究情况，并根据总结的大量国内外资料，提出了石油和天然气运移的各种类型、运移作用的强度以及运移物质运动时发生的化学变化的概念。书中援引了各种油气显示的实验资料，并且对油气聚集和油气藏形成问题提出了一些新的理论概念。

此外，应当特别指出，本书用了大量篇幅详尽地来探讨物质运移时发生的化学和生物化学作用，在科学文献中是很值得重视的。

本书可供石油地质研究人员、教学人员和石油工作者参考。

油 气 运 移

B. A. 索柯洛夫 著
郑厚安 义 和 译

*

科学出版社出版（北京朝陽門大街117号）

北京市書刊出版業營業許可証出字第061号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经销

*

1959年8月第一版
1959年8月第一次印刷
(草)0001-2,000

套号: 1841 字数: 837,000
开本: 850×1168 1/32
印数: 12 9/8

定价: 2.00 元

序

石油和天然气在地壳中的运移是一个极其复杂的问题，这一问题早在最初试图阐明石油生成和油藏形成的时候就已产生了。

B. A. 索柯洛夫教授的这一著作阐述了这方面的科学研究的现状，并且引用了一些理论性质的和试验性质的资料。

书中提出了关于石油和天然气运移的各种类型、运移作用的强度以及运移物质在运动过程中发生的化学变化的概念。此外，还援引了大量关于油气从油气藏运移到地表的各种油气显示的试验资料。在本书结论部分，根据对运移过程的研究，提出了油气聚集和油气藏形成条件的概念。

作者对油气运移方面的现有资料进行了总结，从而在这一方面提出了一些新的理论概念。

对天然气成分资料所做的总结以及作者提出的新分类法具有很大的意义。

B. A. 索柯洛夫教授和他的同事们对碳氢化合物气体和蒸气在岩层中的扩散及微量渗滤作用进行了多年的研究。研究结果就得出了有关扩散作用的特点和规模的明确结论，从而在这一方面提出对油气成因问题和油气的地球化学勘探方法都有意义的新概念。

B. A. 索柯洛夫的著作用了不少篇幅来探讨物质运移时发生的化学和生物化学作用。在科学文献中还是第一次如此详尽地研究这一问题。

在地表上的油气显示，特别是微量油气显示这个研究领域内，B. A. 索柯洛夫和他的同事们发现了很多前人所不知道的、跟天然气从油气藏中向外运移有关的新现象。

曾经发现在油藏区地面上有气态碳氢化合物的微量显示；在底土和土壤中有氧化亚氮这种以前不知道的气体组分，有氧化碳氢气体并和碳氢气体一样可以作为含油气标志的细菌。具有理论根据并

3A6 19/01

由气测、气测井和細菌气测试验证了这些研究,说明石油的地球化学勘探法是有希望的。

石油和天然气的聚集,即油气儲集或油气藏的形成是一个极为复杂的问题。不管生油母质的性质如何,油气儲集的形成显然只能是油气在一些地壳地段中运移的结果,这些地段(“圈闭”)的物理和地质条件要保证油气能够长期保存下来。

在 B. A. 索柯洛夫的著作中,不但研究了石油和天然气的生成条件,并且也研究了导致油气藏形成的运移条件。此外,还专门研究了已经形成的油气藏在地质时期中的扩散现象。

B. A. 索柯洛夫的这一著作对石油和天然气在地壳中的复杂而多样化的运移现象提出了崭新的达到现代科学水平的概念。

根据这些现象的物理和物理化学的实质以及化学作用在发生运移现象的地质环境中的意义,作者进一步发展了有关运移现象的理论。

经作者发展的某些概念,特别是有关油气藏形成方面的概念,还是值得讨论的。

但是,毫无疑问,这一著作将有助于正确地了解油气运移现象以及正确地运用在这方面所获得的资料来解决石油地球化学和石油地球化学勘探方法方面的理论和实际问题。

苏联科学院院士 A. B. 托普契耶夫

目 录

序	(i)
緒 言	(1)
第一章 石油和天然气的成分以及它們儲集的物理条件	(4)
1. 天然气的成分	(4)
2. 石油的成分	(27)
3. 瀝青	(35)
4. 石油和天然气在地壳中儲集的物理条件	(37)
参考文献	(48)
第二章 天然气运移的主要类型	(50)
1. 天然气的滲濾作用	(51)
2. 天然气的溶解和吸附	(70)
3. 天然气的扩散作用	(80)
4. 天然气在沉积岩层中运移的一般性質	(91)
5. 不稳定气体的运移	(104)
参考文献	(110)
第三章 石油在岩层中的滲濾及其他运移方式	(111)
1. 石油的滲濾作用	(111)
2. 在有天然气和水的条件下石油的滲濾作用	(117)
3. 石油的上浮	(124)
4. 石油因岩层压紧和变形而发生的运移	(127)
5. 毛細管現象和吸附現象对石油运移的影响	(136)
6. 石油的扩散作用	(146)
参考文献	(148)
第四章 地下水及其中所含物質的运动	(150)
1. 地下水的成分	(150)
2. 地下水的滲濾作用	(156)
3. 地下水中所含鹽分的扩散	(167)
参考文献	(168)

第五章 生物化学作用对石油及天然气运移的影响	(170)
1. 細菌在沉积岩及地下水中分布的普遍性	(172)
2. 生物化学作用对碳氢化合物在深处运移的影响	(177)
3. 使深处碳氢化合物生物氧化强度降低的因素	(190)
4. 碳氢化合物在表层岩石中的生物氧化作用	(196)
参考文献	(206)
第六章 化学反应对油藏内运移组分的影响	(208)
1. 碳氢化合物和其他天然有机物的分解	(209)
2. 碳氢化合物同岩层的相互作用	(214)
3. 运移碳氢化合物在地表条件下的氧化	(219)
4. 放射性元素的影响	(224)
5. 放射性元素的辐射对运移气体的影响	(234)
6. 同运移鹽分的反应	(239)
参考文献	(246)
第七章 地面上的油气显示	(247)
1. 含油显示	(247)
2. 气苗	(251)
3. 关于微含气显示和对它起影响的各种因素的一般概念	(257)
4. 由于气体运移而形成的气体異常和其他地球化学異常	(276)
参考文献	(302)
第八章 石油和天然气的聚集和分散	(304)
1. 油气形成的条件	(305)
2. 石油和天然气聚集条件的一般概念	(331)
3. 石油和天然气在垂直运移时的聚集	(351)
4. 石油和天然气在陆台条件下聚集的特点	(358)
5. 石油和天然气的分散	(368)
参考文献	(377)
結論	(380)

緒 言

对石油、天然气和地下水进行的研究証明，它們在任何情況下都不是靜止的，而是由于物理和化学形成作用而經常移动着的。天然气、石油、水以及其中的溶解物質受各种天然因素的作用而发生的这种移动就是运移現象。

气态物質特別易于运移。液体物質——石油和地下水——虽然在某些情況下能作远距离运移，但它們运移的可能性往往是有限的。

如果只从物理观点出发，固态的岩石和矿物发生位移的可能性最小。实际上它們只能因地壳运动而发生岩层或岩块的位移。但由于化学作用和在地下水中的溶解作用，某些岩石和矿物也能发生运移。

石油和天然气的运移是一个极其重要的問題，这一問題对于闡明油气藏形成的过程和条件，油气藏分散和破坏的过程和条件，以及以研究油气显示及与其有关的含油气标誌为基础的石油普查勘探方法都具有很大的意义。

石油和天然气的运移对背斜頂部的油气儲集形成的作用，早在上世紀中叶及末叶初次研究沉积岩中油、气、水的分布情况时就已經指出过了。

Д. И. 門捷列耶夫曾把油气儲集的形成看作是它們从深处岩层向上运移的結果。水沿岩层中的裂縫向地下运移而天然气和气态石油从深处向上部有孔隙岩层运移的見解，乃是 Д. И. 門捷列耶夫提出石油矿物生成假說的基础^[1]。

В. И. 維尔納斯基^[2]在1912年发表了“論地壳中的气体交換”一書，書中提出了有关天然气运移以及各种气苗（气流、气体蒸发等等）的概念。

在 И. М. 古勃金^[3]、А. Д. 阿尔汉格爾斯基^[4]和其他許多学者关于石油成因和油田形成問題的著作中，都認為石油和天然气的运

移具有重大的意义。

В. П. 卡里茨基^[6]不同意多量的油气运移能够在沉积层中形成油气藏的说法。我們知道很多著作都指出这一概念是錯誤的^[3,4,6]。

在現代的一些研究中,都很重視石油和天然气的运移及聚集^[6-8]。

应当指出外国的学者們也在油气的运移和聚集方面进行了很多的研究^[9-11]。

虽然运移現象經常被用来闡明油气藏和油气田的形成,但对运移現象本身的性質和条件到現在仍有很多不明的地方。

在油矿問題中,液体和气体在有孔隙介質中的滲濾現象是研究得比較好的^[12-16]。在这种情况下所指的并不是决定于自然因素的运移作用,而是开发油气藏时液体和气体在人为条件作用下的运动。

近来,由于进行了气測和其他研究,所以积累了有关油藏在地表岩层中的天然气微量显示的大量資料^[17]。这些微量气苗是由于天然气从油气藏中运移出来而造成的。

本書旨在总结已經积累的各种資料,并根据較多的影响运移作用的各种有关現象进一步研究油气的运移問題。

要想了解运移現象,首先應該确定:在岩层中存在的是怎样的碳氢化合物和其他气态和液态物質或它們的混合物,以及它們在什么条件下能够发生运移。

因此,首先应当研究有关石油及天然气成分以及它們所处的各种岩层的深度的一般概念。其次要研究油气运移的各种途徑和性質,以及运移物質在岩层中的分布情况、运移过程的速度和强度。

运移物質在运动过程中可能由于化学作用和生物化学作用而发生不同程度的各种变化,这些变化有时会对运移情况和运移强度起一定的影响。

應該指出,化学和生物化学作用对油气运移的影响問題直到現在几乎还没有进行研究,因此我們有必要來說明这个問題的情况。

在地表見到的油气显示,是油气从較深的油气儲集运移出来而造成的。書中有一章所闡述的油气显示資料是研究油气在自然条件

下运移的實驗資料。

要研究的問題中還有石油和天然氣在某些“圈閉”中聚集的問題，即有利於一定數量的油氣在上復及下伏岩層的天然有孔隙油滲中聚集的問題。

作者決不僭望把與油氣運移有關的全部問題都談到。其中有很多問題還研究得很差，需要進行更詳盡的理論和實驗研究。

第一章 石油和天然气的成分以及 它們儲集的物理条件

我們研究石油和天然气在岩层中运移的現象时,首先接触到的問題就是:岩层中所含的究竟是那一种碳氢化合物抑或其他气态及液态物質,以及它們在地壳中儲集的条件和形式如何。这些气态和液态物質的化学特性和物理性質决定着它們能否运移和运移的强度。

物理条件,主要是岩层中的温度和压力,这些乃是决定石油和天然气运移特点和强度的最重要条件之一。

下面講到的石油和天然气的成分及它們在岩层中儲集的物理条件都是今后研究油气运移問題的重要先决条件。

1. 天然气的成分

因天然气的运移而提出的天然气成分的初步概念,应归功于 B. И. 維尔納斯基院士^[2]。

1912年, B. И. 維尔納斯基总结了当时仅有的少数有关天然气的資料,研究了它們的分类,并在研究天然气及其与地壳气体交替中的作用时指出以下几点意义:

- 1) 天然气的形态,也就是它在地壳中儲集的形式;
- 2) 天然气的化学成分;
- 3) 天然气在空間和时间上的历史。

就形态而論,天然气可分为以下几种:

- 1) 游离气(大气);
- 2) 岩石孔隙中的气体;
- 3) 气流;
- 4) 蒸气;
- 5) 溶解气(海洋、湖泊、河水中的气体以及各种泉水中的气体);

6) 固溶气(岩石和矿物的吸附气)。

B. II. 維尔納斯基所說的游离气就是大气圈中的各种气体。岩石孔隙中所含的气体在这里被分为单独的一类。

气流是指地下逸出的大量气体而言。B. II. 維尔納斯基所說的气流或渦流又分作: 1) 火山气流; 2) 構造气流; 3) 地表气流。

所謂火山气流就是从地下深处的岩漿源和熔岩中, 由活火山或死火山噴出的气体。这种气体是流动在地下深处, 在高温下化学反应的产物。

B. II. 維尔納斯基所說的構造气流則是由于地壳的大地構造运动的影响从各种气体儲集中逸散到地表的气体。这里所指的主要是从沉积岩中逸出的气体。B. II. 維尔納斯基的著作中指出, 在气流出口附近逸出的气体則不屬於構造气流一类。

地表气流是因风化壳中的化学作用和生物化学作用而形成的。这里所指的不仅是地球最表层的土壤及底土层中的气体, 并且还包括大气圈空气能够到达的較深处的气体。B. II. 維尔納斯基特別把自流井中逸出的以及淺煤层中的气体划归为地表气流这一类。B. II. 維尔納斯基所談的气流是相当大的气体逸出。同时, 他把“蒸气”当作天然气的一种单独类型。这就是从地表、海洋、河流和各种水域表面以及从地下逸散到大气中的那些肉眼看不見的极为細小的气体。这种成扩散状态而逸出的气体, 由于数量很小, 所以不能形成“气流”或“渦流”。B. II. 維尔納斯基还把各种“气味”也划归为蒸气一类。

無論是气流或者是各种蒸气都將进入大气圈, 并形成游离气。

B. II. 維尔納斯基把溶解在海洋、河水、湖泊以及各种泉水里的气体也划分为一种单独类型。泉水可以是火山形成的, 也可以是構造运动形成的或表流形成的。

最后一种形态类型是固溶气。呈吸附状态存在于岩石和矿物本身中的气体都屬於这一类型。吸附气可以在岩石和矿物表面呈“濃縮現象”, 此外, 一部分气体也可以更深地位于固体構造和結晶中。

B. II. 維尔納斯基根据天然气的化学成分又把它們分成以下几类:

- 1) 地表气;
- 2) 与高温有关的气体;
- 3) 透过地壳的气体。

这一分类假定在不同地球化学条件下形成或儲集的气体具有各不相同的化学成分。事实上,地表气与其他天然气不同,它具有独特的成分。大气的主要特点則是它含有游离氧和各种稀有气体。大气成分的这些特点在一定程度上在沉积岩上层土壤和底土中的气体以及溶解在地表水中的气体里也可以看到。

在地球最表层,主要是在土壤中,由于生物化学作用形成各种气体,这些气体能使土壤中的空气具有独特的成分。

与高温有关的气体或火山气的化学成分也有与其他天然气极不相同的特点。

B. И. 維尔納斯基在說明这些气体的成分时指出,其中除含有一般組分,如 CO_2 、 N_2 、 H_2 、 CH_4 、 H_2O 和稀有气体外,还有 HCl 、 Cl_2 、 HF 、 SO_2 、 SO_3 、 H_2S 、 C_nH_m 以及因岩石受高温作用而形成的其他气体。

透过地壳的气体主要是指構造气流。这类气体具有各不相同的組分。有的以氮为主,有的以碳酸气为主,有的則以甲烷为主。因此, B. И. 維尔納斯基又把構造气流分成: 1) 含氮的; 2) 含碳酸气的; 3) 含甲烷的; 4) 含氫的气流。

B. И. 維尔納斯基曾指出, 含氫的气流一般是很少見的一种气流。后来对天然气成分的研究更証实了他的这一預見。B. И. 維尔納斯基又曾指出, 透过地壳的气体在化学成分上,除了上述的主要类别外,在地壳深处一定还有第五种气流——水气流,因为在深处的高温作用下,水必定处于气体状态。我們可用火山区逸出的水蒸汽和噴泉作为这种类型的例子。

透过地壳的气体的成分中絕不只上述几种組分。其中还可以含有稀有气体、硫化氫、各种气态碳氫化合物以及其他气态物質。

应当指出,不論是上述分类和所采用的术语:“透过地壳的气体”、“構造气流”等等,或者是 B. И. 維尔納斯基的著作本身的名

称——“地壳气体交替”——都说明他把天然气看成了是在岩石中运移并跟大气交替的物质。

后来在天然气方面的一些研究都证实了 B. И. 维尔納斯基所提出的基本原理。

B. B. 別洛烏索夫^[18]也曾提出过天然气的分类,后来这一分类被称作“成因”分类。在成因分类中,根据决定天然气形成的各种因素,可將其分成以下几类:

- 1) 生物化学作用形成的气体,其形成取决于生物化学作用;
- 2) 空气中的气体,即空气跟岩石圈中所含的各种组分;
- 3) 化学作用形成的气体,取决于一般条件下和高温下的自然化学作用;
- 4) 放射性作用形成的气体。

后来, A. Л. 柯茲洛夫^[19]又在其中补充了放射性化学作用形成的和核子反应形成的两种气体。

应当指出, B. И. 维尔納斯基的形态分类直到现在还具有一定的意义。而上述气体生成因素也同样具有一定的意义。

但是,为了綜合已收集到的有关研究天然气的大量資料,就必须有更詳細的研究方案。

首先,我們应当按照下列順序来研究一下現代的关于天然气成分的資料:

- 1) 大气;
- 2) 地表气;
- 3) 沉积岩中的气体;
- 4) 火成岩中的气体。

这几类气体的成分是各不相同的。最有意义的是沉积岩中的气体,在沉积岩中有油田气、气田气、煤田气、岩石中呈扩散状态的气体以及其他气体。

大 气

我們知道,空气的主要成分是氮和氧。氫和碳酸气的含量則很

少。在去掉水蒸汽后,上述組分的含量如下:

%		%	
氮	78.09	氫	0.93
氧	20.95	碳酸气	0.03

除上述四种气体外,空气中还有总含量約为 0.0025% 的微量組分。

空气中微量組分的含量列举如下:

%		%	
氦	0.0018	氙	0.000008
氮	0.00052	甲烷	<0.000005
氫	0.0001	比甲烷重的碳氫化合物	<0.000001
氫	0.00005	氧化亞氮	<0.00005

前五种組分的含量系根据 Л. 柯別尔^[20]的資料。至于所引用的甲烷、重碳氫化合物气体和氧化亞氮等气体的最大可能濃度則系大气圈低层的,而且是用專門的微量气体分析仪器^[17]測到的。

除上述組分外,大气中还含有臭氧和一氧化氮。

大气还可以渗透到土壤、底土和基岩的上层中。

地 表 气

动植物遺体在地球表层、土壤及底土中进行分解,这种分解作用主要是决定于微生物的作用。由于有机物遺体的分解形成了各种气态物質,它們可以跟滲入土壤和底土中的空气混在一起。

如果我們所說的是沼澤区或各种蓄水池(湖泊、河流、瀉湖等)时,則在这些蓄水池底部,在底部軟泥层中以及水中的动植物物質都要发生分解。在这种跟大气隔絕的条件下,有机物发生的是无氧分解。

在土壤层里所形成的气体成分中,見有碳酸气、甲烷、氧化亞氮、氫、一氧化氮和氨。含硫和亞磷酸鹽的蛋白質分解可以形成揮发性硫、磷化合物。此外,活的植物有机体以及它們的叶和根可以把各种揮发油、萜烯、植物杀菌素和其他揮发性有机化合物排泄到大气中去。

因有机物遗体分解而形成气体的过程,主要发生在地表和土壤层中。这些土壤层又跟大气发生很强烈的气体交替,因而上述挥发性物质大部分都扩散到大气中,另一部分则为土壤中的有机物所吸收。愈往深处去,上述挥发性物质的浓度也就愈低。

关于非含油区 2—3 公尺深处的底土层空气成分,经综合了大量资料之后,证明其中除含氮、氧和稀有气体外,其他组分的浓度常如下述:

	%
碳酸气	0.2—5
甲烷	10^{-4} — 10^{-3}
氧化亚氮	10^{-4} — 10^{-3}

只有在个别情况下,CO₂ 的浓度才超过 2—3%,N₂O 的浓度达到 10^{-2} %。如果把空气组分除外,则土壤及底土中形成的气体里,CO₂ 平均可佔 99.5% 以上。

对非含油区底土空气的绝大多数分析表明,底土中实际上是不含重碳氢化合物气体、乙烷和丙烷的,因为它们们的浓度小于测量的最大误差 (10^{-6} %)。很多专门的分析表明,这些碳氢化合物在底土空气中的浓度是在 10^{-6} % 以下。

地表气应再被划分为在沼泽中和各种水域底部软泥沉积中形成的气体。在这些地方,有机物是在完全无氧或部分无氧的条件下进行分解的。

沼气绝不象对它进行专门的研究以前那样,被认为是纯甲烷。在许多情况下,沼气中几乎不含有甲烷或者只含浓度为 10—20% 的甲烷。有时,甲烷的浓度也可以达到 50—60%,甚至更多一些。但是,沼气中 CH₄ 的浓度很少有达到 90% 以上的。

游离的沼气中,除甲烷外,通常还含有 CO₂ 和 N₂。在个别情况下含有氧。有时沼气中也含得有氢(达 8%)。

关于沼气中(除了甲烷以外)其他较重碳氢化合物气体的含量问题是非常有意义的。很多研究都说明,沼气中实际上是不含这些重碳氢化合物的^[21,22]。

莫斯科区和加里宁区、格鲁吉亚西部和克拉斯诺达尔边区的沼

气都曾用低温精餾法进行了一系列的分析。在进行低温精餾法分析时，对重碳氢化合物气体和氧化亞氮都进行了测定。几乎全部分析都証明，这些气体的总濃度不超过0.01—0.02%。只有个别的分析表明，沼气中含有氧化亞氮，这样一来，重碳氢化合物的实际含量更要低于上述数值了。專門的研究还确定，假如在非含油区的沼气中也有重碳氢化合物的話，那末它們在沼气中的含量通常要低于 $10^{-8}\%$ 。

沉积岩中的气体

沉积岩中的气体，可將其分为油田气、純气田气和煤田气。

天然气的大量儲集經常出現在油田和煤田中。

另外，还有既不与石油直接有关又不与煤有关的大大小小的單独气体儲集。这样的可燃气体的儲集可能是由于气体从油田或煤經远距离远移而形成的，有的时候也可能是單独構成的純气体儲集。

除了沉积岩中相当巨大的气体儲集之外，在整个沉积岩层中还有呈扩散状态的大量气体，呈單独的小包裹体以及呈溶解和吸附状态的气体（在油田或煤田之外）。

油田气和气田气 在研究油田气并跟其他气体相比較时，我們可以看到天然石油气成分的一个特点，这就是其中除含甲烷外，还含有較重的气态碳氢化合物。油田气中含有乙烷、丙烷、丁烷、異丁烷以及液态碳氢化合物的蒸汽。

这些气态重碳氢化合物在石油气中的含量并不相同——从百分之十几到百分之几十。

油田气的主要成分絕大部分是碳氢化合物。但在很多石油气中，特别是第二巴庫的石油气中，还含得有大量的氮。

表1所列系苏联以及外国最著名油田天然气的成分^[28-27]。

在各不同时代的油田气中，重碳氢化合物的含量都很高。譬如在格罗茲內地区和克拉斯諾达尔边区中新世地层中，天然气就含有濃度很大的重碳氢化合物。

在古生代地层中，天然气所含重碳氢化合物的濃度也很大。不